

HERRAMIENTA DE ANÁLISIS ESPACIAL MULTICRITERIO PARA OPTIMIZAR LA UBICACIÓN DE VERTEDEROS

Sánchez Gil, Susana¹; Jato-Espino, Daniel²; Lobo, Amaya¹

¹ Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros 44 39005 Santander, España, susanasanchezg@alumnos.unican.es; amaya.lobo@unican.es

² Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros 44 39005 Santander, España, daniel.jato@unican.es

Resumen

El incremento en la producción de Residuos Municipales (RM) en espacios urbanos y la alta ocupación de las instalaciones ya existentes para su eliminación son dos factores que pueden impulsar la necesidad de construir nuevos vertederos. En este contexto, el presente artículo tiene por objeto diseñar una herramienta de análisis espacial multicriterio para optimizar la ubicación de vertederos de RM. En primer lugar, se propone el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para localizar zonas adecuadas para la implantación de vertederos de acuerdo a las restricciones y limitaciones a su ubicación propuestas en el Real Decreto 1481/2001 relativo a las instalaciones de eliminación de residuos, de actual vigencia en el territorio español. En segundo lugar, se plantea una metodología de análisis multicriterio que combina las técnicas AHP (*Analytic Hierarchy Process*) y TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) para seleccionar la ubicación óptima de entre las zonas adecuadas en función de su impacto económico, ambiental y social. La aplicación de la herramienta propuesta al caso de estudio de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (Navarra) permitió la selección del emplazamiento más idóneo para ubicar un nuevo vertedero de RM de acuerdo a su impacto en términos de criterios de sostenibilidad.

Palabras clave: *gestión de residuos municipales, análisis multicriterio, selección de emplazamiento, sistemas de información geográfica, vertederos*

1. Introducción

La normativa estatal vigente en materia de eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero es el RD 1481/2001 (Ministerio de Medio Ambiente, 2013a). En cuanto a la normativa europea, destaca la publicación, el 19 de noviembre de 2008, de la Directiva sobre residuos 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (EUR-Lex, 2008). Las opciones de gestión según dicha normativa por orden de prioridad son: prevención, preparación para la reutilización, reciclaje, otros tipos de valorización y eliminación. Por tanto, la normativa prima el resto de actividades sobre la eliminación. Sin embargo, el depósito de residuos en vertederos seguirá siendo necesario para la eliminación final de aquellos residuos no aprovechables. Este hecho, unido al incremento en la producción de RM en espacios urbanos y la alta ocupación de las instalaciones ya existentes para su eliminación, actúan como factores impulsores de la construcción de nuevos vertederos.

El objetivo del presente estudio es elaborar un procedimiento que permita optimizar la ubicación de instalaciones de eliminación de residuos combinando el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

con herramientas de decisión multicriterio. La metodología planteada se validará mediante su aplicación al caso de estudio de la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona (MCP), dada la problemática actual de la misma en cuanto a la eliminación de residuos.

Dicha Mancomunidad, que agrupa al 55% de la población de Navarra (Portal de la Dirección General del Catastro), vierte sus residuos en el vertedero de Góngora, el cual tiene previsto como fecha de cierre el 31/12/2022 debido a un convenio de la MCP con el ayuntamiento del Valle de Aranguren. Una vez clausurado, la Mancomunidad debería trasladar sus residuos a los vertederos de Cárcar o Ribera. Estos vertederos, sin embargo, se encuentran alejados de la planta de tratamiento de los mismos situada también en Góngora. Este hecho provocaría un gran incremento de los costes de transporte de los residuos y se incrementarían las emisiones atmosféricas asociadas al mismo. Por todo ello, el Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra (PIGRN) con horizonte 2017-2027 deja abierta la posibilidad a la ubicación de un nuevo vertedero para la fracción resto (FR) de la MCP (Departamento de Desarrollo Rural, 2016). En este contexto se enmarca el presente estudio de ubicación de un nuevo vertedero para la MCP cuya metodología, resultados y conclusiones se recogen en los siguientes apartados.

2. Metodología

A continuación se define la metodología seguida para obtener la ubicación más adecuada para el vertedero. Dicha metodología se aplica en dos fases: en primer lugar se localizan las zonas adecuadas para la ubicación del vertedero utilizando herramientas SIG, y en segundo lugar se realiza una priorización de las mismas mediante un análisis multicriterio.

2.1 Delimitación de zonas adecuadas con SIG

Se han utilizado una serie de restricciones y limitaciones a la ubicación de vertederos según el desarrollo técnico del Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre para el presente estudio (Ministerio de Medio Ambiente, 2013a). Aunque no se trata de normativa de obligado cumplimiento, el desarrollo del presente Real Decreto está suficientemente avalado por la práctica y se trata de un documento generalmente aceptado en este ámbito. A continuación se recogen las restricciones y limitaciones tenidas en cuenta junto con la aplicación de las herramientas SIG a las mismas (ESRI, 2013). La unión de todas estas restricciones configura un mapa de zonas adecuadas y no adecuadas a la ubicación del vertedero. El conjunto de capas vectoriales *shapefiles* necesarias para el análisis se han obtenido mayoritariamente de la página web IDENA en su apartado de descargas (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra).

Áreas inestables: zonas con peligro de deslizamiento, caída de bloques, etc. Se descartan zonas de pendiente superior al 8%. Con la herramienta *slope* se obtienen las pendientes superiores al 8% del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Comunidad Foral de Navarra.

Áreas cársticas y cavidades subterráneas: dolinas o sistemas cársticos de desarrollo vertical a los que se aplica una distancia de 100 metros del perímetro exterior del vertedero. Con la herramienta *buffer* se aplica un radio de influencia de 100 metros a las zonas cársticas y a las cuevas obtenidas en formato *shapefile*.

Aguas continentales superficiales: el vertedero no puede ubicarse en terrenos de Dominio Público Hidráulico ni zonas de servidumbre o policía según el RDL 1/2001 (Ministerio de Medio Ambiente, 2013b). Tampoco en zonas con riesgo de inundación para la avenida de periodo de retorno de 100 años. Se aplica un *buffer* de 100 metros (zona de policía) en el *shapefile* de cursos de agua. Para las zonas con riesgo de inundación se carga dicha capa y se seleccionan con la herramienta *select by attributes* aquellas con periodo de retorno inferior a 100 años.

Aguas continentales subterráneas: la distancia vertical entre la cota mínima del fondo de excavación y el nivel freático debe ser superior a 2 metros. Además, no se permite ubicar el vertedero en zonas de vulnerabilidad alta de acuíferos. Con el *shapefile* de vulnerabilidad de acuíferos, se seleccionan aquellas

zonas de vulnerabilidad alta y se utiliza la malla de puntos de valores de nivel freático generada por Fan *et al.* (2013) para caracterizar el nivel freático. Tras realizar una interpolación de la capa de puntos, se seleccionan aquellas zonas con cota del nivel freático inferior a 14 metros (2 metros de resguardo + 12 metros de excavación).

Zonas húmedas (humedales): el vertedero debe ubicarse fuera de las zonas húmedas recogidas en el inventario de humedales elaborado por la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Con la capa de zonas húmedas se realiza un *buffer* de 1000 metros.

Espacios naturales protegidos y vías pecuarias: no puede ubicarse el vertedero en zona con figura de protección del medio natural declarada ni en vías pecuarias reguladas por la ley 3/95 de Vías Pecuarias. Utilizando la capa de Red Natura 2000 y la de vías pecuarias se obtienen las zonas no adecuadas según esta restricción.

Zonas residenciales: se debe respetar una distancia de 1000 metros entre el perímetro del vertedero y el núcleo urbano. Para elementos del patrimonio arquitectónico se establecen 100 metros de distancia al vertedero. Ambas restricciones se aplican mediante la herramienta *buffer* anteriormente señalada.

Seguridad aeroportuaria: se aplicará una distancia de 3 km a aeropuertos comerciales. Se utiliza la herramienta *buffer* sobre el *shapefile* de aeropuertos de Navarra aplicando un radio de influencia de 3000 metros.

2.2. Priorización de zonas

Obtenidas las zonas adecuadas para la ubicación del vertedero, se seleccionan 10 localizaciones o polígonos con suficiente superficie para situar el mismo en la Comunidad Foral de Navarra, a fin de llevar a cabo el análisis multicriterio que se expone a continuación. Se ha considerado como superficie mínima necesaria para el vertedero 40 hectáreas (Bosque Sendra *et al.*, 1999).

La ubicación de una instalación de eliminación de residuos provoca impactos económicos, ambientales y sociales más o menos importantes dependiendo del lugar donde se ubique (criterios de carácter espacial). En la Tabla 11 se recogen los criterios que se han tenido en cuenta para realizar el análisis.

Tabla 11: Criterios y subcriterios tenidos en cuenta en el análisis

Tipo de criterio	Subcriterios
Económico	SC 1.1) Expropiaciones; SC 1.2) Material de Cobertura; SC 1.3) Coste de transporte de los residuos; SC 1.4) Costes de funcionamiento de la instalación (temperatura)
Ambiental	SC 2.1) Emisiones; SC 2.2) Vulnerabilidad de los acuíferos; SC 2.3) Proximidad a la Red Natura; SC 2.4) Generación de lixiviados (precipitaciones)
Social	SC 3.1) Cercanía a núcleos de población; SC 3.2) Cuencas visuales; SC 3.3) Vientos

El valor de cada subcriterio a utilizar en el análisis se ha obtenido realizando operaciones matemáticas básicas sobre los resultados obtenidos con la ayuda de las herramientas de los SIG. Cada subcriterio se ha dividido en un conjunto de categorías a las que se le han asignado valores en función de los costes, impactos o afecciones causadas.

Definidos los criterios, es necesario valorar la importancia relativa de los mismos y definir los escenarios que se tendrán en cuenta en el análisis. Los pesos de los subcriterios se han obtenido mediante el método AHP (Analytic Hierarchy Process), creado por Saaty (1980), que tiene por objeto determinar la importancia relativa de un conjunto de elementos de acuerdo a una escala de comparación por pares.

Además, se han considerado los siguientes escenarios para analizar la sensibilidad de los resultados y la adecuación de cada alternativa según los criterios seleccionados: escenario equilibrado (mismo peso para los 3 criterios), preponderancia económica (60% para el criterio económico y 20% para el social y el

ambiental), preponderancia ambiental (60% para el criterio ambiental y 20% para el económico y el social) y preponderancia social (60% para el criterio social y 20% para el económico y el ambiental).

Para realizar una valoración de las propuestas planteadas, así como para obtener un ranking de preferencia de las mismas, se ha utilizado el método TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981). Este método se basa en que la mejor propuesta es la más cercana a la solución ideal positiva (PIS-Positive Ideal Solution) y la más alejada de la solución ideal negativa (NIS-Negative Ideal Solution). La aplicación del método TOPSIS se resume en los siguientes pasos: definición de la matriz de toma de decisiones, normalización de la matriz, determinación de la matriz de decisión ponderada normalizada, cálculo de la solución ideal positiva y negativa, determinación de la distancia de cada propuesta a la PIS y a la NIS y finalmente cálculo de la cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal ($0 < R_i < 1$, siendo 1 la solución ideal).

3. Resultados

3.1. Delimitación de zonas adecuadas

Con ayuda de herramientas SIG y aplicando las restricciones y limitaciones del desarrollo técnico del RD 1481/2001, se han obtenido una serie de planos de zonas no adecuadas para ubicar el vertedero, de acuerdo a los criterios descritos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las zonas adecuadas (verde) y no adecuadas (azul) para la ubicación del vertedero, así como las zonas seleccionadas para el análisis multicriterio.

3.2. Priorización de zonas

Una vez seleccionadas las zonas de posible ubicación del vertedero, se calculan los valores de cada subcriterio con ayuda de los SIG. Tras ello y antes de comenzar con el análisis de las alternativas, en la Tabla 2 se muestran los pesos de los subcriterios tras aplicar el método AHP.

Tabla 12: Peso de los subcriterios

C1 (económico)				C2 (ambiental)				C3 (social)		
W_{sc11}	W_{sc12}	W_{sc13}	W_{sc14}	W_{sc21}	W_{sc22}	W_{sc23}	W_{sc24}	W_{sc31}	W_{sc32}	W_{sc33}
0,125	0,125	0,625	0,125	0,375	0,125	0,125	0,375	0,333	0,333	0,333

Finalmente, la Tabla 3 recoge un resumen de los resultados obtenidos tras la aplicación del método TOPSIS para los 4 escenarios planteados, incluyendo la posición de cada una de las propuestas para cada escenario y el valor de R_i alcanzado, con el objetivo de facilitar la toma de decisión final.

4. Discusión

Con base a estos resultados, se podría concluir que la propuesta Z4 es la mejor zona para la ubicación de las instalaciones de vertido, ya que obtiene buenas puntuaciones en relación a todos los criterios. Además, repite dos veces como mejor alternativa en los escenarios 1 y 4, quedando segunda en los escenarios 2 y 3. A pesar de ello, Z4 alcanza valores de R_i que están lejos de la solución ideal. Esto pone de manifiesto que varios de los factores considerados están en conflicto, siendo necesaria la aplicación de metodologías como la propuesta para obtener conclusiones globales y poder introducir mejoras en aspectos concretos. Si se estudia R_i de acuerdo a su variabilidad, se observa que dicho parámetro es mayor para los escenarios 2 y 4. Esto se traduce en que los costes económicos y las afecciones sociales son los criterios más decisivos a la hora de determinar la valoración alcanzada por las propuestas.

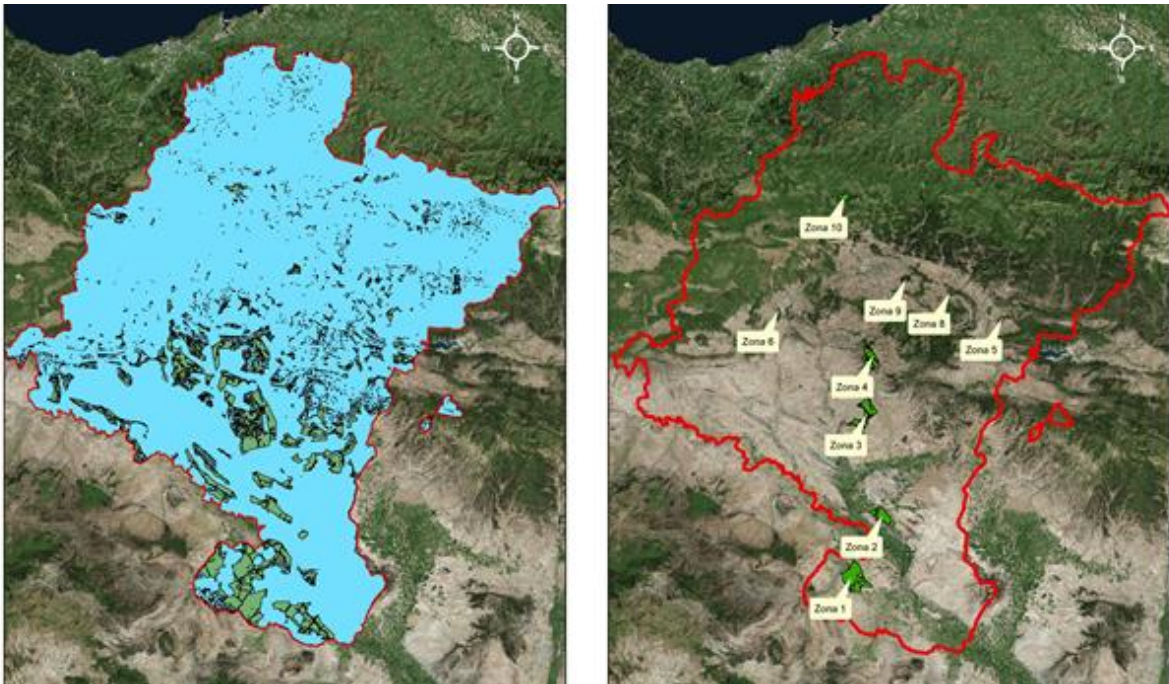


Figura 1: Zonas adecuadas y no adecuadas (izquierda) y zonas seleccionadas (derecha)

Tabla 13: Resumen del ranking de las alternativas según escenario

Escenario		Ranking de zonas									
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Equilibrado	Ranking	9	10	3	1	7	5	4	2	6	8
	R _i	0,46	0,46	0,67	0,75	0,61	0,64	0,64	0,71	0,63	0,61
Prep. económica	Ranking	10	9	6	2	8	7	5	3	1	4
	R _i	0,28	0,31	0,56	0,72	0,53	0,56	0,59	0,69	0,77	0,63
Prep. ambiental	Ranking	9	8	3	2	7	5	6	4	1	10
	R _i	0,47	0,50	0,68	0,70	0,53	0,57	0,55	0,62	0,71	0,43
Prep. social	Ranking	8	9	3	1	6	4	5	2	10	7
	R _i	0,67	0,55	0,81	0,85	0,79	0,81	0,80	0,84	0,47	0,78

De acuerdo a estas consideraciones, la propuesta Z4 sería la elegida como localización para la ubicación del nuevo vertedero. En caso de desarrollarse medidas para reducir las afecciones sociales como barreras osmogénicas (protección contra olores) y campañas de sensibilización, se podría plantear la propuesta Z9 como ubicación alternativa, ya que es la que minimiza los costes económicos de la instalación al ser la más cercana al punto de generación de los residuos.

5. Conclusiones

En el presente estudio se ha planteado el uso de una herramienta de análisis espacial multicriterio para optimizar la ubicación de vertederos de residuos municipales. La metodología planteada contribuye eficazmente a reducir el trabajo y tiempo necesarios para llevar a cabo esta tarea, posibilitando la integración de indicadores de diversa índole en la misma que dotan al análisis de mayor rigor. La validez de los procedimientos usados queda contrastada mediante su aplicación al presente caso de estudio.

Aunque se han obtenido soluciones notables desde el punto de vista de la sostenibilidad, se ha detectado que los factores económicos y sociales son los más influyentes en el proceso de toma de decisiones. La implementación de medidas como el uso de vehículos eléctricos, la utilización de barreras osmogénicas y

la realización de campañas de concienciación a la población son las vías para conseguir alternativas más idóneas con impactos económicos, ambientales y sociales mínimos.

Finalmente, como línea de investigación futura se podría plantear el desarrollo de una aplicación o software que automatice la metodología propuesta, proporcionando así una herramienta fácil de manejar que pudiese ser aplicada por usuarios no expertos en los conceptos teóricos en que se fundamenta. Asimismo, su uso dentro del ámbito de la ingeniería ambiental se podría extender al estudio de ubicación de otras instalaciones de tratamiento de residuos (plantas de reciclaje, incineración, etc.), adaptando la metodología a sus circunstancias y condicionantes específicos.

Referencias

- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Rodríguez Espinosa, V. (1999). Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en un SIG. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, 295-323.
- Departamento de Desarrollo Rural, M. A. (2016). *Programa de prevención y Plan de Gestión del Plan de Residuos de Navarra 2017-2027*.
- ESRI (2013). ArcGIS for Desktop. Environmental Systems Research Institute (ESRI): Redlands, CA, USA.
- EUR-Lex (2008). *Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas directivas*.
- Fan, Y., Li, H., & Miguez-Macho, G. (2013). Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science*, 339(6122), 940-943.
- Hwang, C., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. *New York: Springer-Verlag*.
- Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra*. Obtenido de <http://idena.navarra.es/Portal/Inicio>
- Ministerio de Medio Ambiente (2013a). *RD 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*.
- Ministerio de Medio Ambiente (2013b). *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas*.
- Portal de la Dirección General del Catastro*. Obtenido de <http://www.catastro.meh.es/>
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resources allocation*. McGraw-Hill.